

турбины. Однако, данную погрешность можно связать с еще не изученными техническими возможностями программы. Во всем остальном моделирование с помощью программы Aspen Plus можно считать успешным и дальнейшее ее изучение перспективно.

Результаты исследования:

- осуществлено моделирование внутристанционных процессов в программе Aspen Plus;
- получены элементарные характеристики для процессов газификации;
- установлено, что программа Aspen Plus позволяет проводить математического моделирования процессов газификации.

Список использованных источников

1. Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3.
2. Schingnitz M, Mehlhouse F. The GSP process-entrained flow gasification of different types of coal. // Clean coal technology conference. 2005.
3. Holt N. Operating experience and improvement opportunities for coal based plants // Mater High Temp 20 (2003) 1–6 Contents.
4. Abaimov N.A., Osipov P.V., Ryzhkov A.F. Experimental and computational study and development of the bituminous coal entrained-flow air-blown gasifier for IGCC // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 754. № 11. С. 112001.
5. Ogriseck K. Untersuchung von IGCC Kraftwerkskonzepten mit Polygeneration und CO₂ Abtrennung. Thesis. Technische Universität Freiberg; 2006.
6. Штерензон В.А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / Екатеринбург: изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с.
7. Бобков С.П. Моделирование систем: учеб. пособие / С.П. Бобков, Д.О. Бытнев; Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. – Иваново, 2008. – 156 с.

УДК 662.76

В. А. Лаптев, В. М. Скурихин, А. Д. Никитин, А. Ф. Рыжков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СЛОЯ РЯДОВОГО УГЛЯ

Аннотация

В рамках разработки промышленной технологии производства синтез-газа и активированного угля в CFD-пакете OpenFOAM создана модель гидродинамики слоевого реактора частичной паровой конверсии. Модель основана на законе Форхгеймера, задача Дирихле на входе задавалась массовым расходом, на выходе поддерживалось постоянное атмосферное давление. Для экспериментального определения гидродинамического сопротивления слоя угля со-

бран холодный лабораторный стенд. Получены зависимости сопротивления при прохождении потока сквозь слой от расхода и высоты слоя. При скоростях среды выше 1,5 м/с сопротивление линейно возрастает с увеличением высоты слоя. По полученным данным выполнена корректировка модели путем изменения эмпирических коэффициентов в формуле Эргуна. Разработанная модель позволила с достаточной точностью описать аэродинамические процессы в слое рядового угля. В дальнейшем планируется разработать модели теплообмена и химических реакций.

Ключевые слова: паровая конверсия, слоевой реактор, аэродинамика, моделирование, вычислительная гидродинамика.

Abstract

The industrial technology of syngas and activated carbon production is being developed. A hydrodynamics model of fixed bed reactor for partial steam conversion has been developed in the OpenFOAM CFD package. The model is based on Forchheimer's law. The inlet of Dirichlet's task was given by the mass flow rate, the outlet maintained a constant atmospheric pressure. For the experimental determination of the coal bed hydrodynamic resistance, a cold laboratory bench was assembled. The dependences of resistance to flow passage through the bed on flow rate and the bed height are obtained. At flow velocities above 1.5 m/s, the resistance increases linearly with increasing bed height. Based on the obtained data, the model was corrected by changing the empirical coefficients in the Ergun's formula. The developed model allowed to describe with sufficient accuracy aerodynamic processes in the ordinary coal bed. In the future, it is planned to develop models for heat exchange and chemical reactions.

Key words: steam conversion, bed reactor, aerodynamics, modeling, computational fluid dynamics.

В настоящее время слоевые процессы имеют широкое распространение в различных отраслях промышленности: в металлургических печах, химических реакторах, энергетических установках, очистных фильтрах. Современным методом разработки установок и расчета протекающих в них процессов является компьютерное моделирование. На первом этапе разработки модели, как правило, описывается гидродинамика – прохождение среды через слой. Существует большое количество стандартных моделей, однако для каждого случая необходимо проверить применимость выбранной модели и внести корректировки для увеличения точности расчетов. В данной работе рассматривается слоевой реактор для производства активированного угля. В ходе активации исходный уголь (древесный или ископаемый) помещается в реактор с внешним нагревом, где через него пропускается водяной пар при температуре 800–1000°C [1]. В результате получается синтез-газ, который может применяться в качестве топлива, и активированный уголь, который широко применяется в качестве сорбента для очистки жидкостей и газов, пищевых, фармацевтических и других продуктов [2]. Ранее проведены экспериментальные исследования зависимости сорбционных свойств получаемого угля от параметров активации в лабораторном реакторе [3]. Для разработки промышленного реактора необходимо создать модель. Целью данной работы является разработка и верификация модели гидродинамики слоевого реактора для активации угля.

Для экспериментального исследования гидродинамики при прохождении потока через слой угля был собран холодный стенд (рисунок 1). Диаметр корпуса стенда соответствует диаметру лабораторного реактора и составляет 60 мм. Слой угля лежит на решётке, аналогичной решётке реактора. Использовался рядовой

уголь с размером частиц от 5 до 50 мм, получаемый при промышленном пиролизе древесины в ретортах с внешним нагревом. С помощью воздуходувки создавался поток воздуха через слой, скорость потока измерялась анемометром. Для измерения избыточного давления перед решеткой, возникающего в результате гидродинамического сопротивления, использовался U-образный манометр. На рисунке 2 показаны результаты измерений сопротивления пустой решетки, слоя рядового угля высотой 400 мм (аналогично проведенным ранее исследованиям) с решеткой, и слоя угля, рассчитанного как разность между кривыми. При скорости потока более 3,5 м/с по визуальным наблюдениям возникало ожижение слоя. На рисунке 3 показана зависимость гидродинамического сопротивления от высоты слоя и скорости потока. При увеличении высоты слоя и скорости более 1,5 м/с сопротивление линейно возрастает.

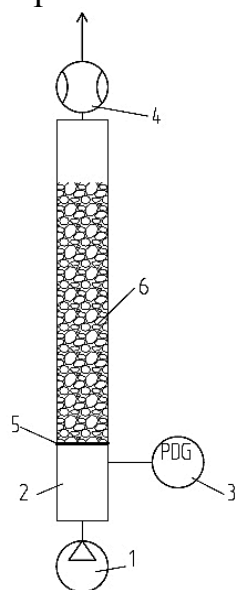


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – воздуходувка; 2 – корпус; 3 – U-образный манометр; 4 – анемометр;
5 – решетка; 6 – слой угля

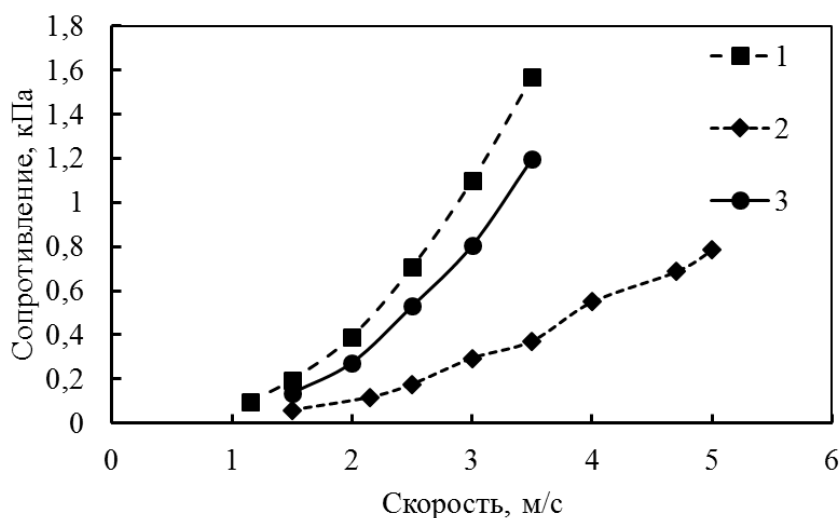


Рис. 2. Гидродинамическое сопротивление:

1 – слой угля высотой 400 мм на решетке; 2 – пустая решетка;
3 – слой угля (расчет)

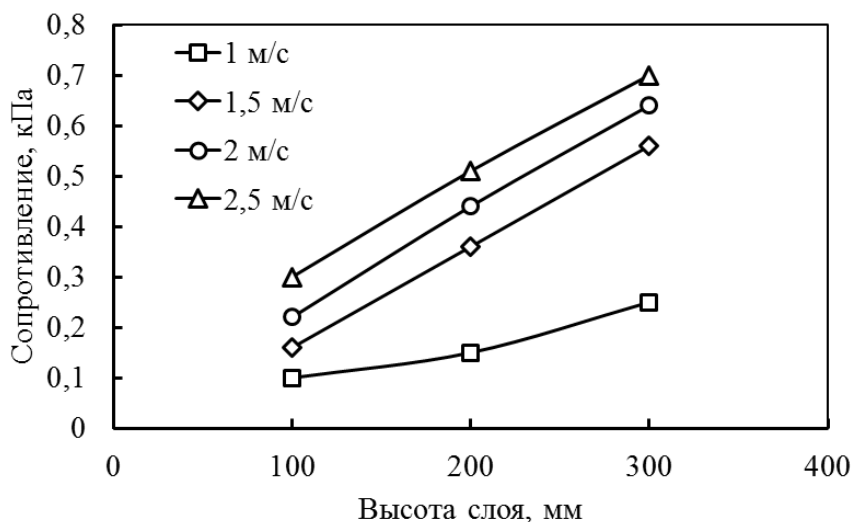


Рис. 3. Зависимость гидродинамического сопротивления от высоты слоя и скорости потока

Модель гидродинамики слоя основана на законе Форхгеймера, вводящего поправку в закон Дарси, которая учитывает инерционные эффекты потока [4-8]:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} \cdot \vec{v} - \beta \cdot \rho \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v}, \quad (1)$$

где p – давление, μ – динамическая вязкость потока среды, K – проницаемость пористого материала, ρ – плотность потока, v – скорость, β – эмпирический коэффициент. Суммируя экспериментальные данные из разных исследований, для технических расчетов Эргун предложил следующую форму записи закона Форхгеймера [6]:

$$\nabla p = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^2 \cdot d^2} \cdot \vec{v} + 1.75 \cdot \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho}{\varepsilon^2 \cdot d} \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

где ε – порозность слоя, d – диаметр частиц слоя (с учетом коэффициента формы для не шарообразных частиц). Вычисляемое таким образом падение давления играет роль источника (стока) в уравнениях Навье-Стокса на участке канала, в котором находится пористый слой.

Моделирование проводилось в CFD-пакете OpenFOAM на сетке с 252141 расчетным элементом. Задача Дирихле на входе задавалась массовым расходом, на выходе поддерживалось постоянное атмосферное давление. На стенках задавались нулевые граничные условия Неймана. Принята гипотеза полного прилипания среды к стенке. Для расчетов использовался алгоритм SIMPLE. На рисунке 4 показаны получившиеся в результате расчета поля скорости и давления при высоте слоя 300 мм и массовом расходе воздуха 5 г/с.

На рисунке 5 показаны результаты верификации разработанной модели. Как видно, модель достаточно точно описывает гидродинамические процессы при прохождении среды сквозь слой. Расхождения могут быть обоснованы погрешностью измерений и незначительными конструктивными отличиями лабораторного стенда от реактора.

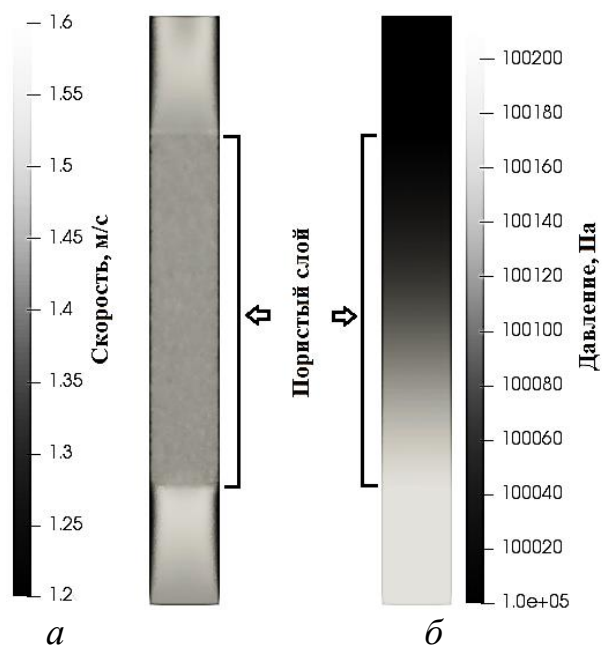


Рис. 4. Скорость (а) и давление (б) в реакторе с пористым слоем угля высотой 300 мм

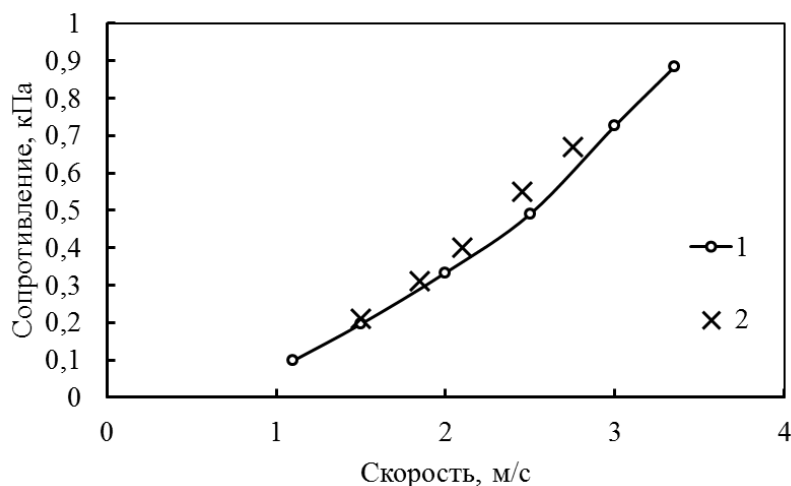


Рис. 5. Верификация модели по экспериментальным данным:
1 – результаты эксперимента; 2 – расчет

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных верифицирована модель гидродинамики слоя рядового угля. В дальнейшем планируется разработка моделей теплопереноса и химических реакций образования синтез-газа и расчет промышленной установки для производства активированного угля.

Список использованных источников

1. Кинле Х., Бадер. Э. Активные угли и их промышленное применение. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
2. Gonzalez-Garcia P. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 1393-1414.

3. Исследование паровой активации древесного угля в реакторе с внешним нагревом / В.А. Лаптев, В.М. Скурихин, А.Д. Никитин, А.Ф. Рыжков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: м-лы междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 834-838.

4. Kaviany M. Principles of Heat Transfer in porous Media. – Springer-Verlag, 1991.

5. Werner Schmidt. Influence of Multidimensionality and Interfacial Friction on the Coolability of Fragmented Corium. PhD thesis, University of Stuttgart, May 2004.

6. Barree R.D., Conway M.W. Beyond Beta Factors: A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer // Flow in Porous Media. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-29 September 2004, Houston, Texas, USA. 978-1-55563-151-2.

7. Nield D., Bejan A. Convection in Porous Media. – Springer, 2006.

8. E. Takasuo, V. Hovi, and M. Ilvonen. PORFLO modelling of the coolability of porous particle beds. Technical report, VTT, 2011.

УДК 669.18

К. П. Левачева, Г. В. Воронов, Е. Е. Кузнецова, И. В. Глухов

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ, РАБОТАЮЩЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОВОГО НОСИТЕЛЯ

Аннотация

В работе рассмотрен тепловой режим современной дуговой сталеплавильной печи (ДСП–120). Представлен расчёт горения природного газа, химический состав горючих компонентов которого состоит из углеводородов парафинового ряда C_nH_{2n+2} . Расчет горения влажного природного газа показан для двух случаев: окислитель – атмосферный воздух, и окислитель – технологический кислород. Определен расход окислителя (кислорода и влажного воздуха), количество продуктов сгорания, химический состав и количество продуктов сгорания с учетом диссоциации диоксида углерода (CO_2) и водяного пара ($H_2O_{пар}$), балансовая температура с использованием i - t диаграммы и по программе электронно-вычислительной машины (ЭВМ) Microsoft Excel.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, теплота сгорания, продукты сгорания, температура, природный газ, окислитель, воздух, кислород, водяной пар, диоксид углерода, диссоциация.

Abstract

The thermal regime of a modern arc steel melting furnace (DSP–120) is considered in this work. Calculation of combustion of natural gas is presented, the chemical composition of its combustible components consists of hydrocarbons of the paraffin series C_nH_{2n+2} . Calculation of the combustion of wet natural gas is shown for two cases: oxidizer – atmospheric air, and oxidizing agent – process oxygen. The consumption of oxidizer (oxygen and moist air), the amount of combustion prod-